

PRIHODNOST IN IZZIVI FOTONAPETOSTNIH MODULOV V SLOVENIJI

Manja Obreza, dipl. inž. energ.

Krško, 23. 6. 2025

Naročnik študije: Borzen, operater trga z elektriko, d. o. o.
Odgovoren predstavnik strank na strani naročnika: Iztok Gornjak
Izvajalec študije: Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko
Sodelujoči pri pripravi dokumenta na strani izvajalca:



prof. dr. Sebastijan Seme



Manja Obreza



Klemen Srpčič



Bojan Stergar



dr. Klemen Sredenšek



Eva Simonič



Jernej Počivalnik



Domen Kuhar

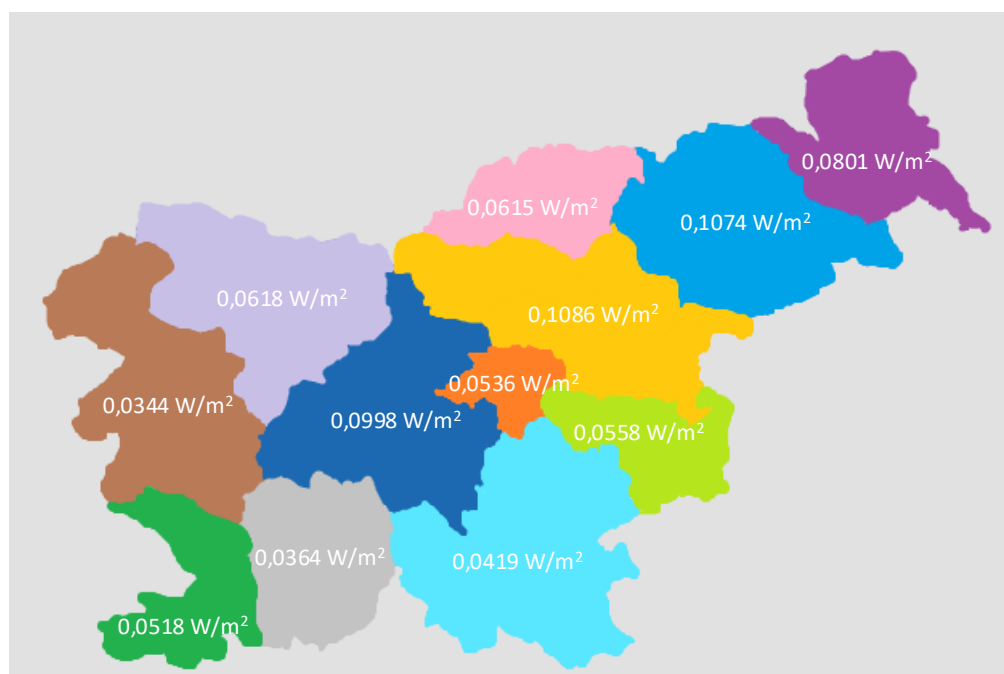
EVROPSKA ZAKONODAJA ZA RECIKLAŽO EEO

- EU je vodilna v uvajanju pravne podlage za OEEO, vključno z fotonapetostnimi moduli.
- **Direktiva 2012/19/EU** je prva direktiva, ki je vključevala pravno podlago reciklaže PV modulov.
- Direktiva 2012/19/EU je bila lansko leto posodobljena z **direktivo EU 2024/884**.
- Države članice morajo zagotoviti več minimalnih ciljev reciklaže in ponovne uporabe za PV module:
 - zahteve za obdelavo,
 - reciklaža in ponovna uporaba,
 - **informacije za obrate za obdelavo in reciklažo,**
 - ločeno zbiranje,
 - **financiranje,**
 - pošiljanje in izvoz odpadnih PV modulov,
 - spodbujanje reciklaže in nove tehnologije,
 - kazni in nadzor nad kršitvami.

SLOVENSKA ZAKONODAJA ZA RECIKLAŽO EEO

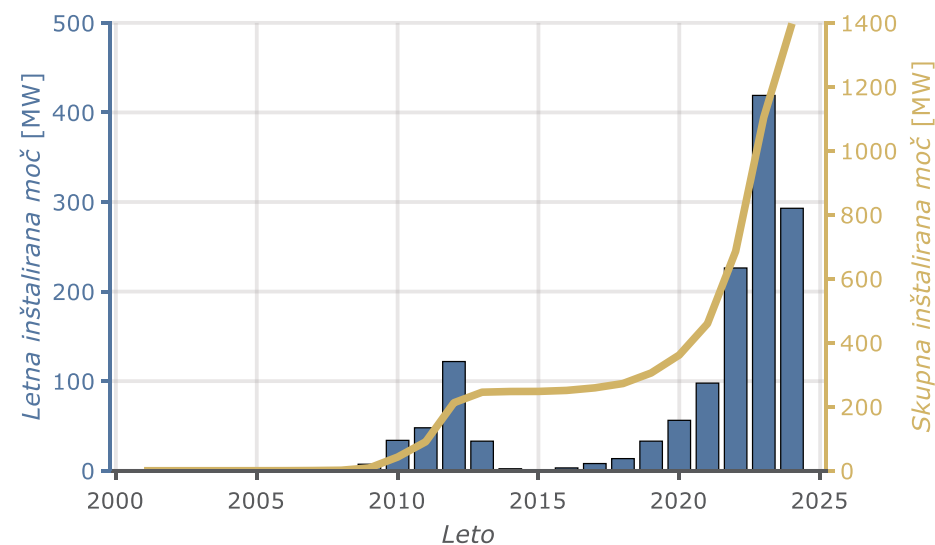
- Uradni list RS, št. 79/19, št. 55/15, št. 47/16, št. 72/28, št. 84/18, št. 108/20 in št. 44/22 povzeti po Direktivi 2012/19/EU in Direktivi 2024/884.
- EPR – extended producer responsibility: Proizvajalci/uvozniki so pravno odgovorni za reciklažo in odstranjevanje PV modulov v skladu z okoljskimi standardi.

TRENTNO STANJE PV SISTEMOV V SLOVENIJI

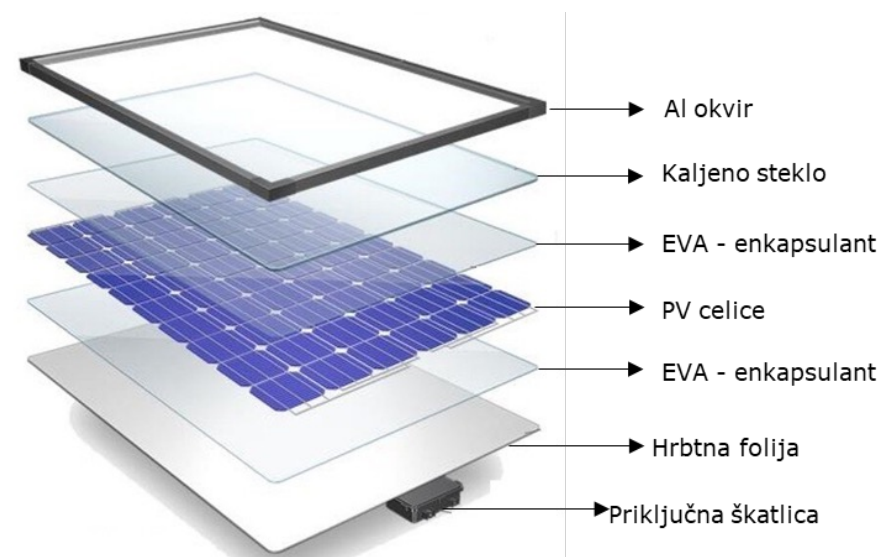
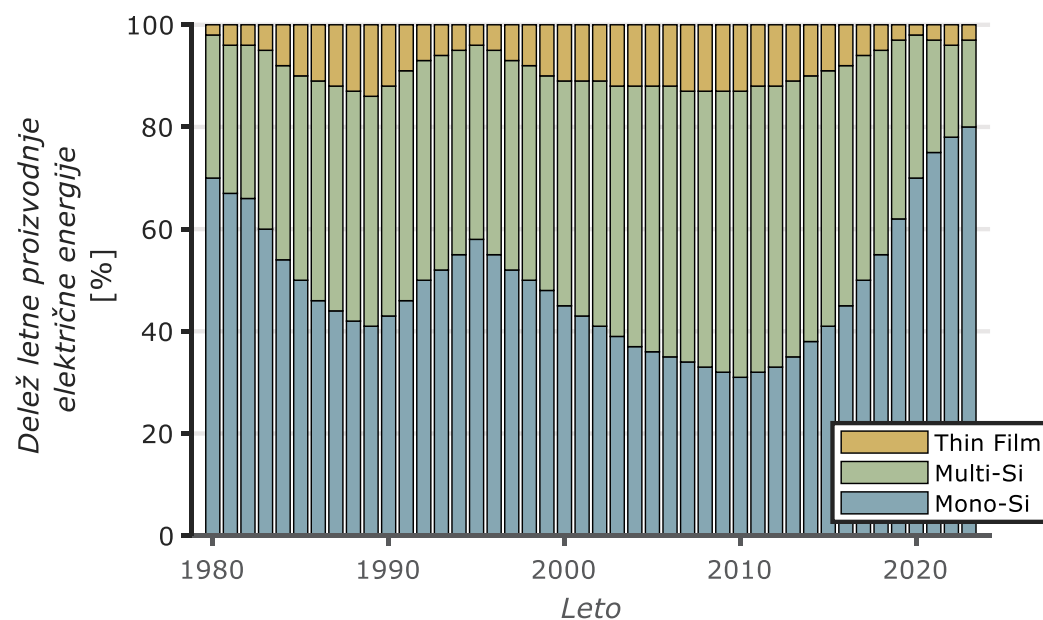


Skupna inštalirana moč PV sistemov: 1.397 MW

Prikaz rasti inštalirane moči PV sistemov v Sloveniji

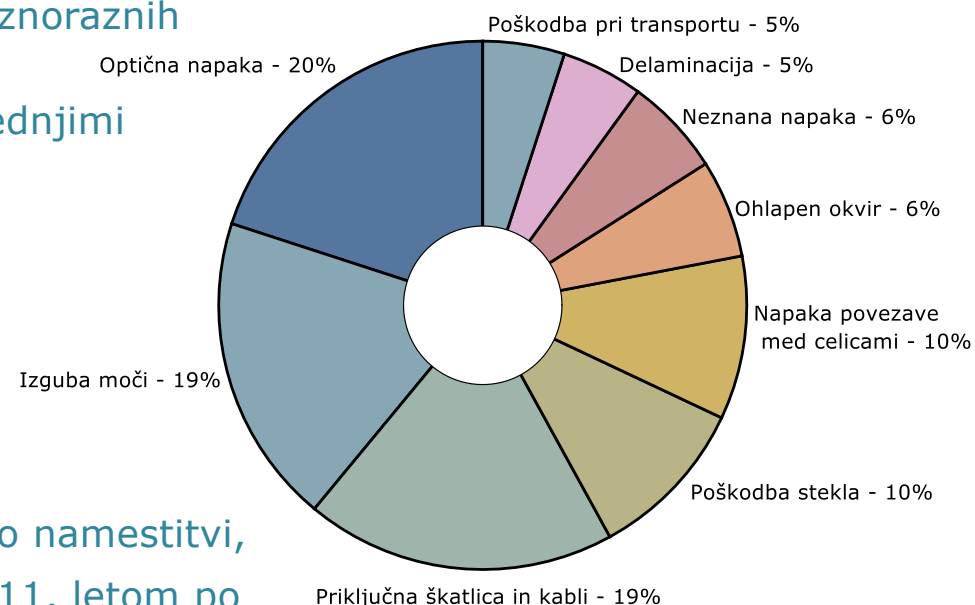


SESTAVA OBSTOJEČIH KOMERCIALNIH PV MODULOV



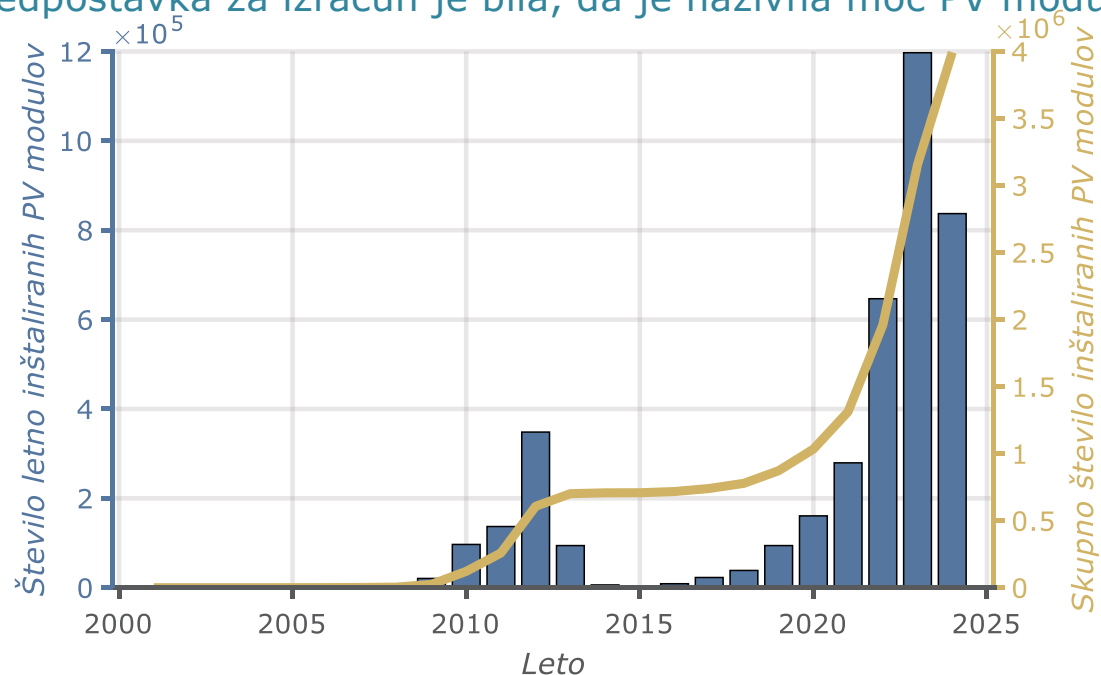
ŽIVLJENJSKA DOBA PV MODULOV

- Pričakovana življenjska doba PV modulov je med 25 in 30 let po sami inštalaciji, vendar lahko zaradi raznoraznih okvar postanejo odpadki tudi prej.
- Največ odpadnih modulov nastane med naslednjimi štirimi fazami življenjskega cikla:
 1. izdelava PV modula,
 2. transport PV modula,
 3. montaža PV modula,
 4. odlaganje PV modula.
- Okvare PV modulov pa se v osnovi delijo na:
 - okvare v zgodnjem obdobju: do 4. leta po namestitvi,
 - okvare sredi življenjske dobe: med 5. in 11. letom po namestitvi,
 - okvare zaradi iztrošenosti modula: 12 let po namestitvi do konca življenjske dobe.



NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH PV MODULOV V SLO

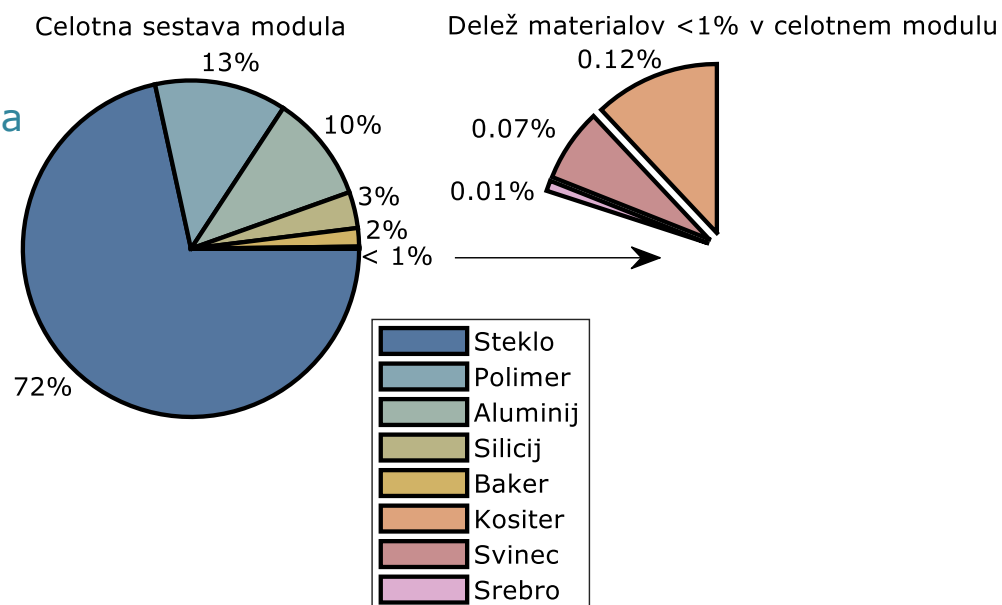
- Na osnovi trenutne inštalirane moči PV sistemov v Sloveniji smo izračunali število letno inštaliranih modulov po posameznih letih.
- Uporabljena predpostavka za izračun je bila, da je nazivna moč PV modulov 350 W.



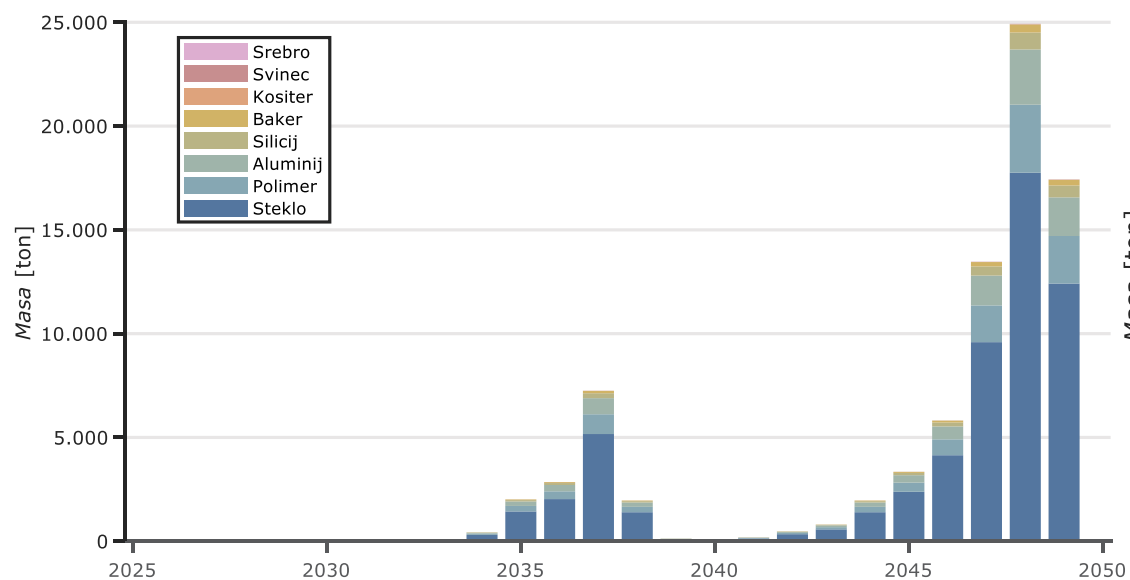
NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH PV MODULOV V SLO

- Za izračun napovedi količine pridobljenih materialov iz reciklaže PV modulov so vhodni parametri:
 - število letno inštaliranih PV modulov (glede na trenutno inštalirano moč PV sistemov),
 - masni ekvivalent: $\frac{18,5 \text{ kg}}{350 \text{ W}} = 52,86 \frac{\text{kg}}{\text{kW}}$,
 - povprečni faktor reciklaže posameznega materiala,
 - materialna sestava PV modula,
 - upoštevana življenjska doba: 25 let.

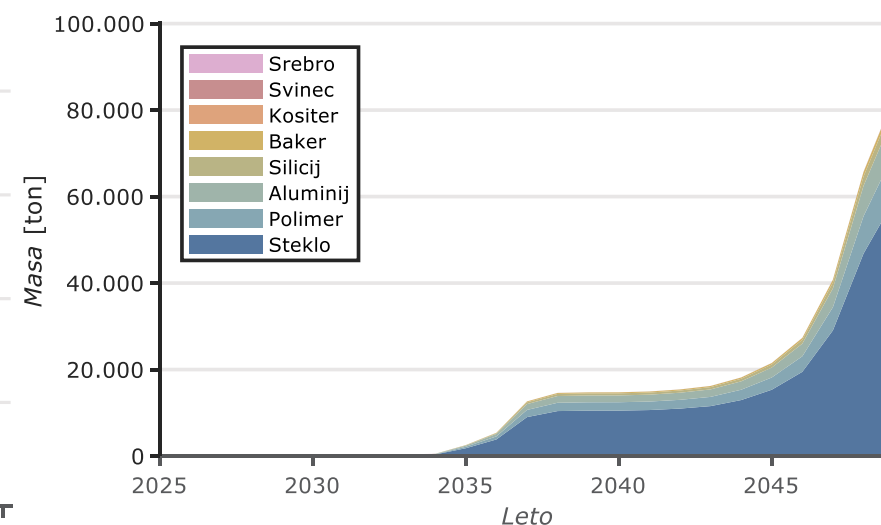
Material	Faktor reciklaže materiala
Steklo	0,96
Aluminij (Al)	1,00
Silicij (Si)	0,91
Baker (Cu)	0,85
Kositer (Sn)	0,32
Svinec (Pb)	0,96
Srebro (Ag)	0,95



NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH PV MODULOV V SLO



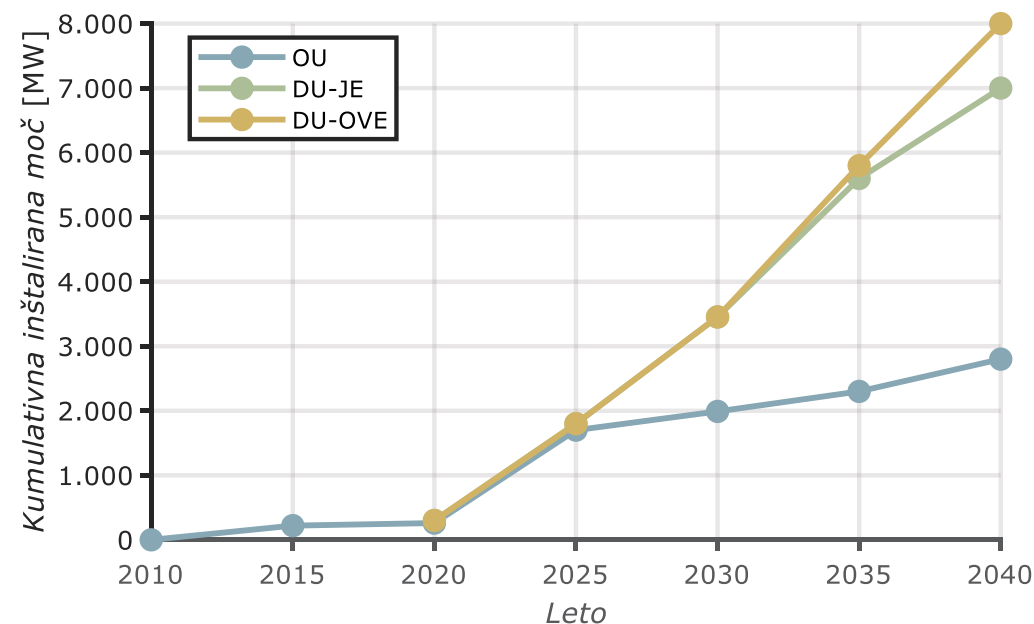
Letna napoved pridobljenih materialov



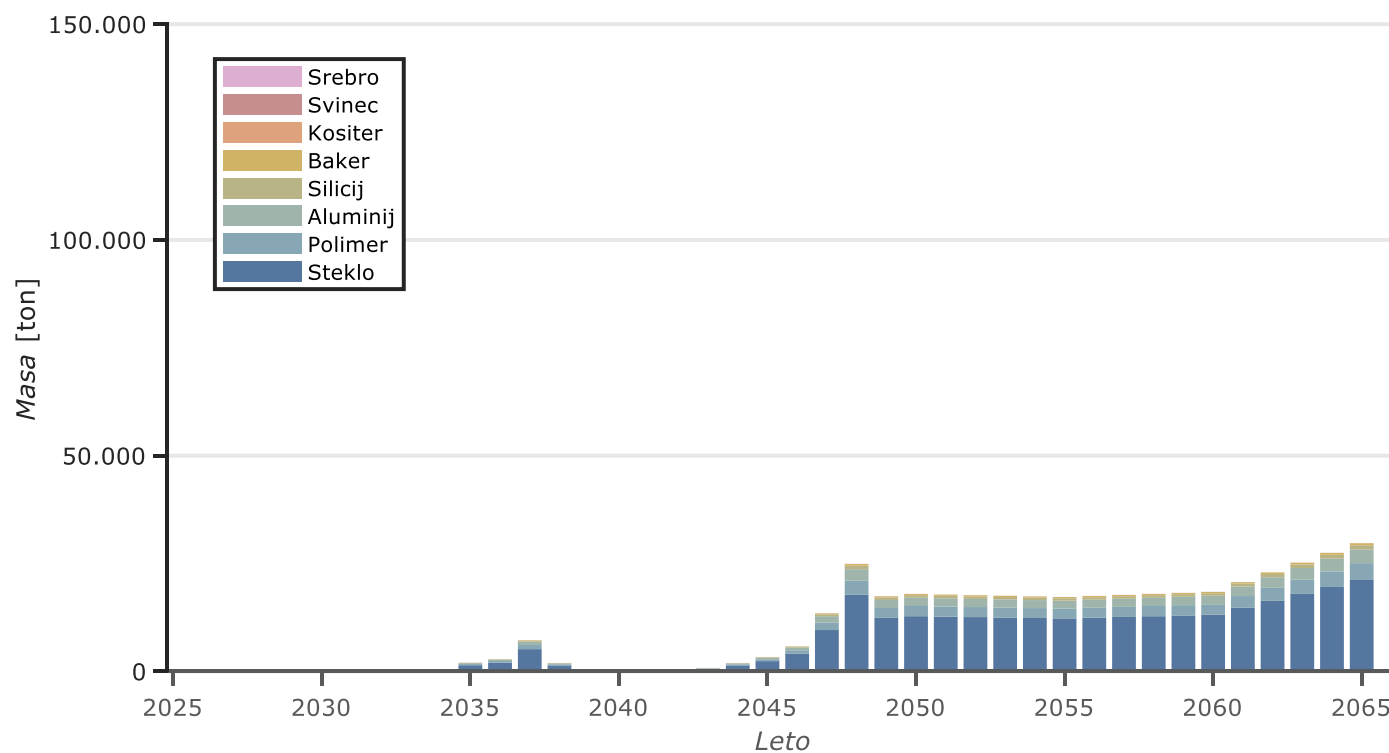
Kumulativna napoved pridobljenih materialov

NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH PV MODULOV V SLO

- Za izračun napovedi količine pridobljenih materialov iz reciklaže PV modulov so vhodni parametri:
 - število letno inštaliranih PV modulov (trenutna in predvidena inštalirana moč po NEPN-u),
 - masni ekvivalent: $\frac{18,5 \text{ kg}}{350 \text{ W}} = 52,86 \frac{\text{kg}}{\text{kW}}$,
 - povprečni faktor reciklaže posameznega materiala,
 - materialna sestava PV modula,
 - upoštevana življenjska doba: 25 let.

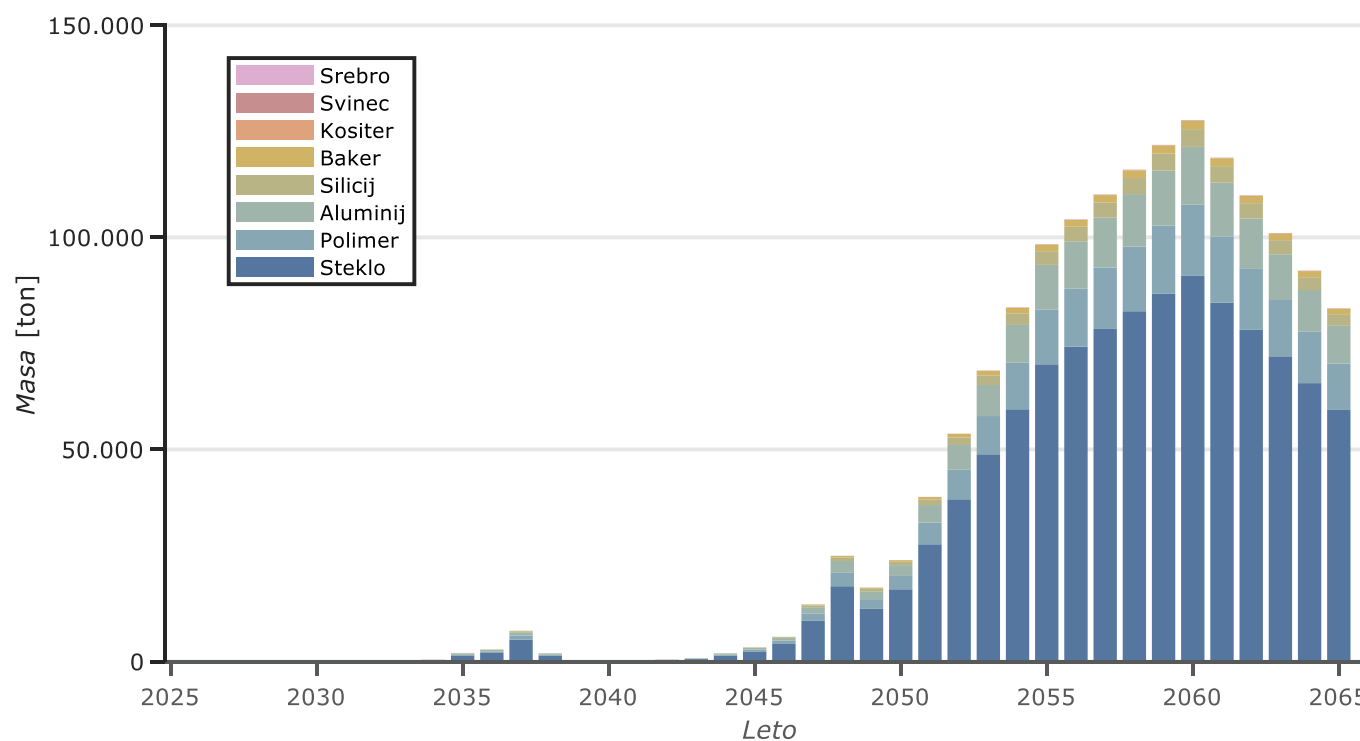


NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH PV MODULOV V SLO



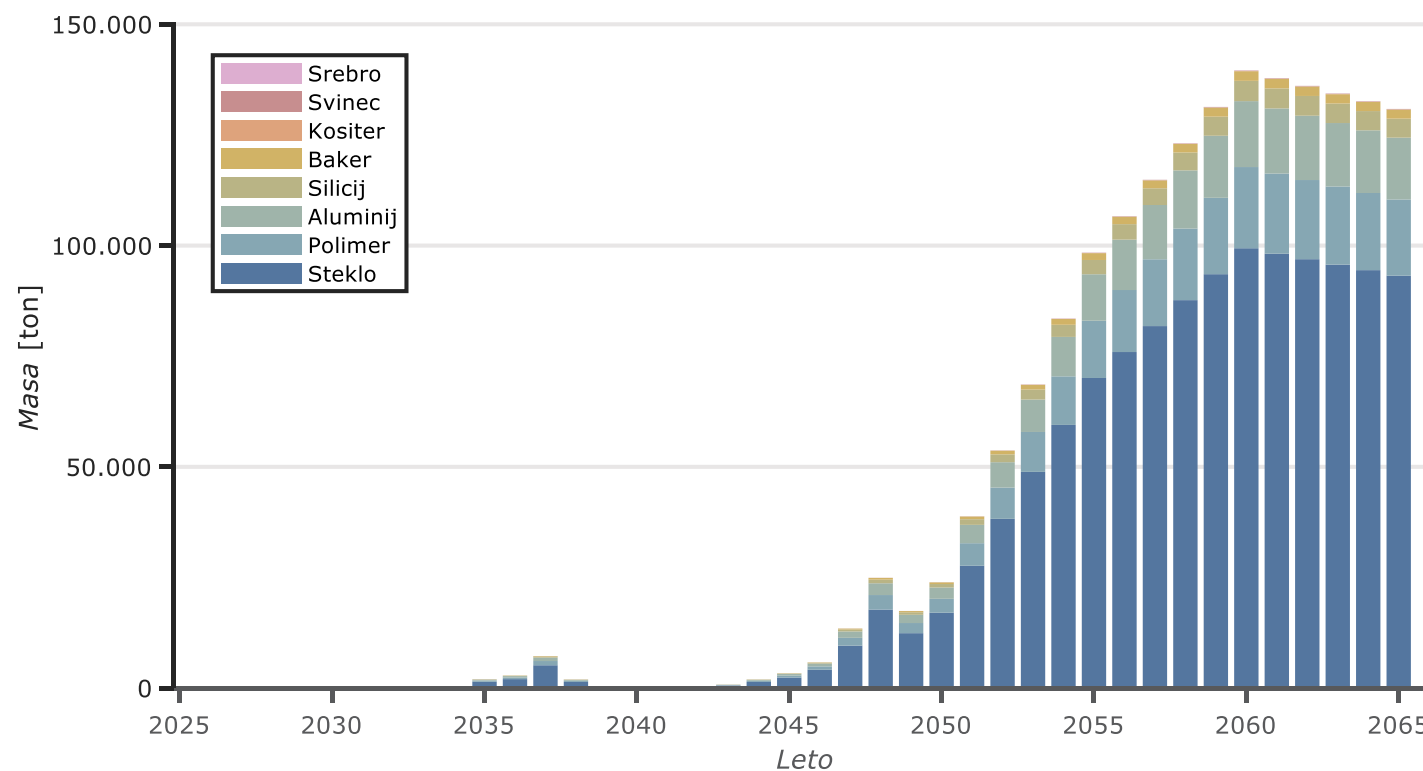
Letna napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij OU

NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH PV MODULOV V SLO



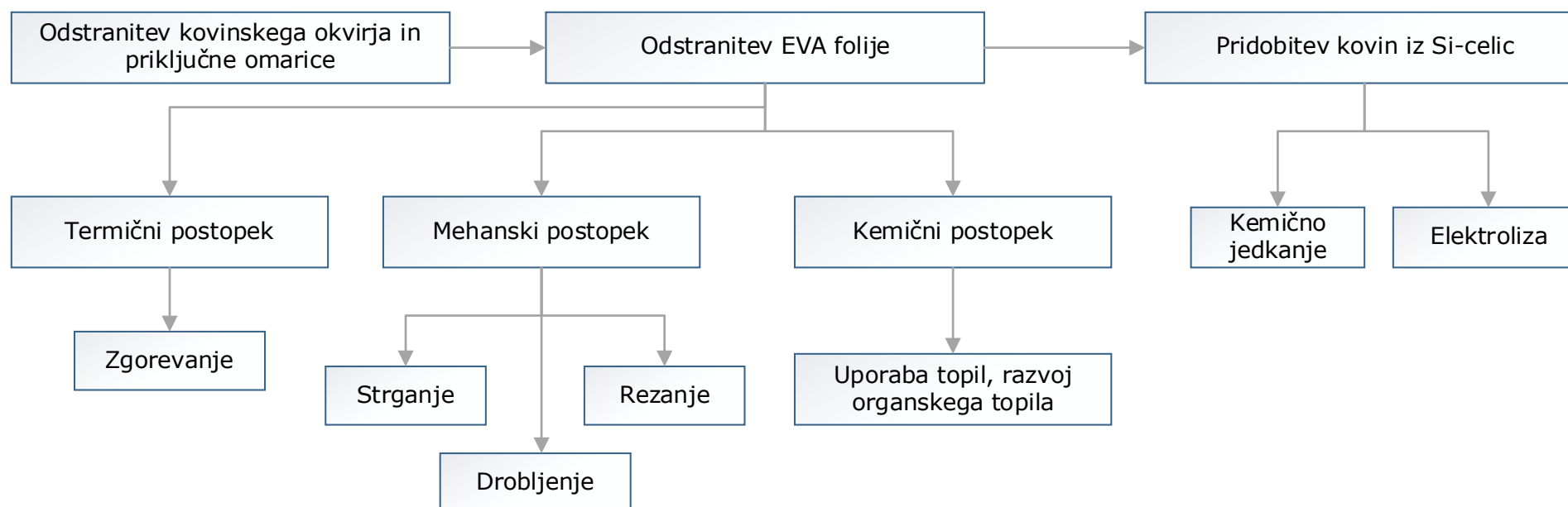
Letna napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij DU-JE

NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH PV MODULOV V SLO



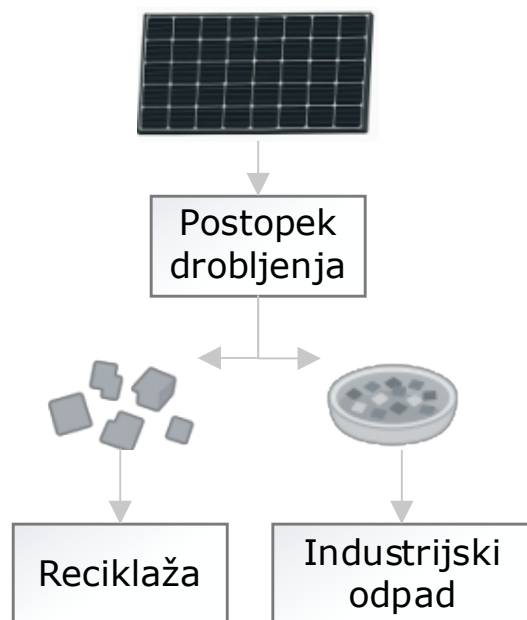
Letna napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij DU-OVE

RAZISKOVALNE RECIKLAŽNE TEHNOLOGIJE

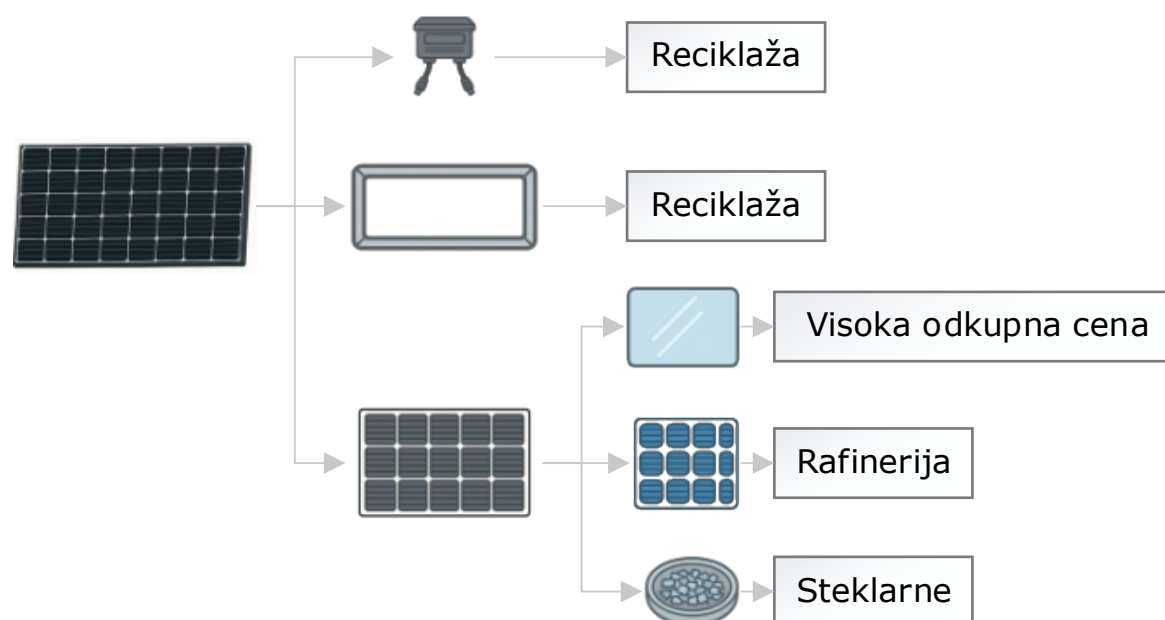


KOMERCIALNE RECIKLAŽNE TEHNOLOGIJE

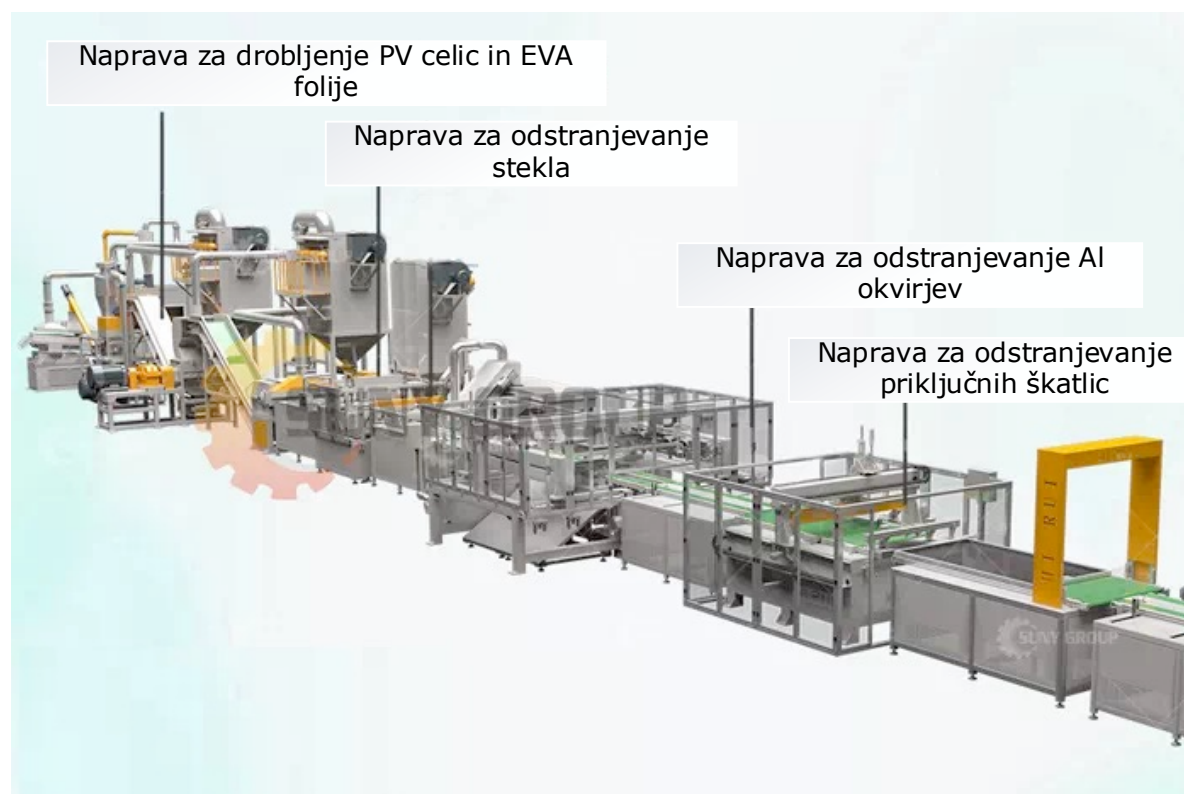
Tradicionalni postopek reciklaže



Napredni postopek reciklaže



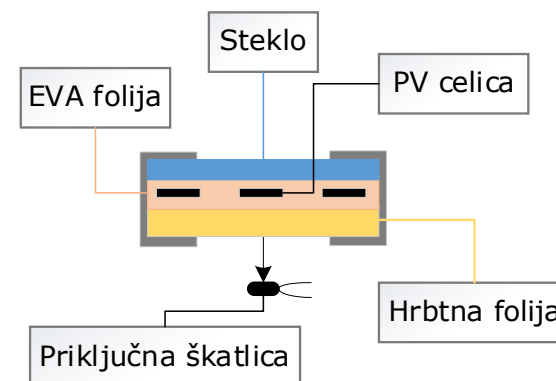
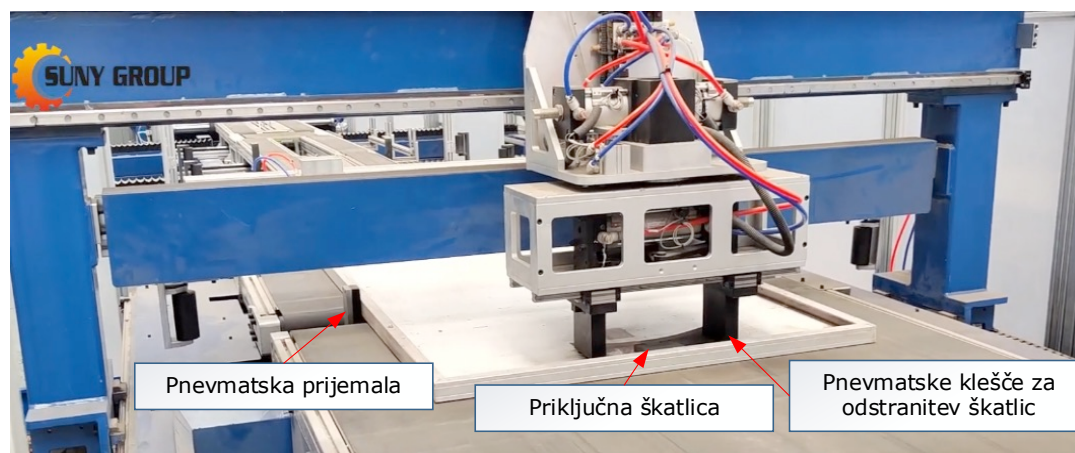
NAPRAVE ZA RECIKLAŽO PV MODULOV



Reciklažna linija PV modulov podjetja Suny Group

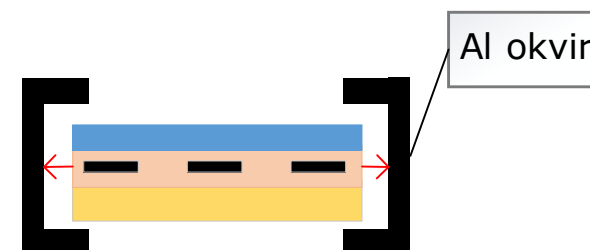
NAPRAVE ZA RECIKLAŽO PV MODULOV

1. Naprava za odstranjevanje priključnih škatlic



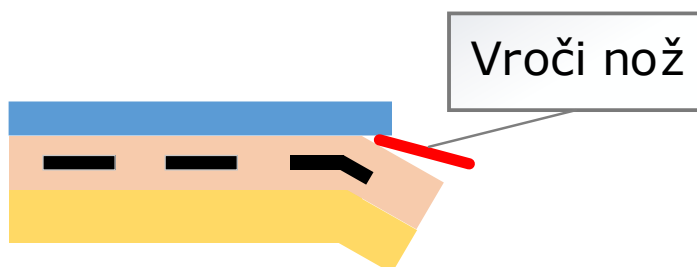
NAPRAVE ZA RECIKLAŽO PV MODULOV

2. Naprava za odstranjevanje aluminijastega okvirja



NAPRAVE ZA RECIKLAŽO PV MODULOV

3. Naprava za ločitev stekla od PV celic



4. Naprava za drobljenje PV celic



5. Zračni ločilnik

6. Elektrostatični ločilnik

MOŽNOSTI ZA VZDRŽNOST RECIKLAŽNE INDUSTRIJE V SLOVENIJI

- Pri analizi je obravnavana naprava, ki temelji na mehanskem postopku reciklaže.
- Predvideno obratovanje naprave je 240 dni/leto, letno omogoča reciklažo 86.400 PV modulov.
- Po postopku reciklaže lahko pridobimo steklo, aluminij in baker.
- Pri oceni ekonomskega potenciala naprave smo upoštevali:
 - povprečno ceno pridobljenih materialov na trgu → predstavlja dobiček,
 - fiksne obratovalne in vzdrževalne stroške,
 - začetno investicijo: 1.000.000,00 €.

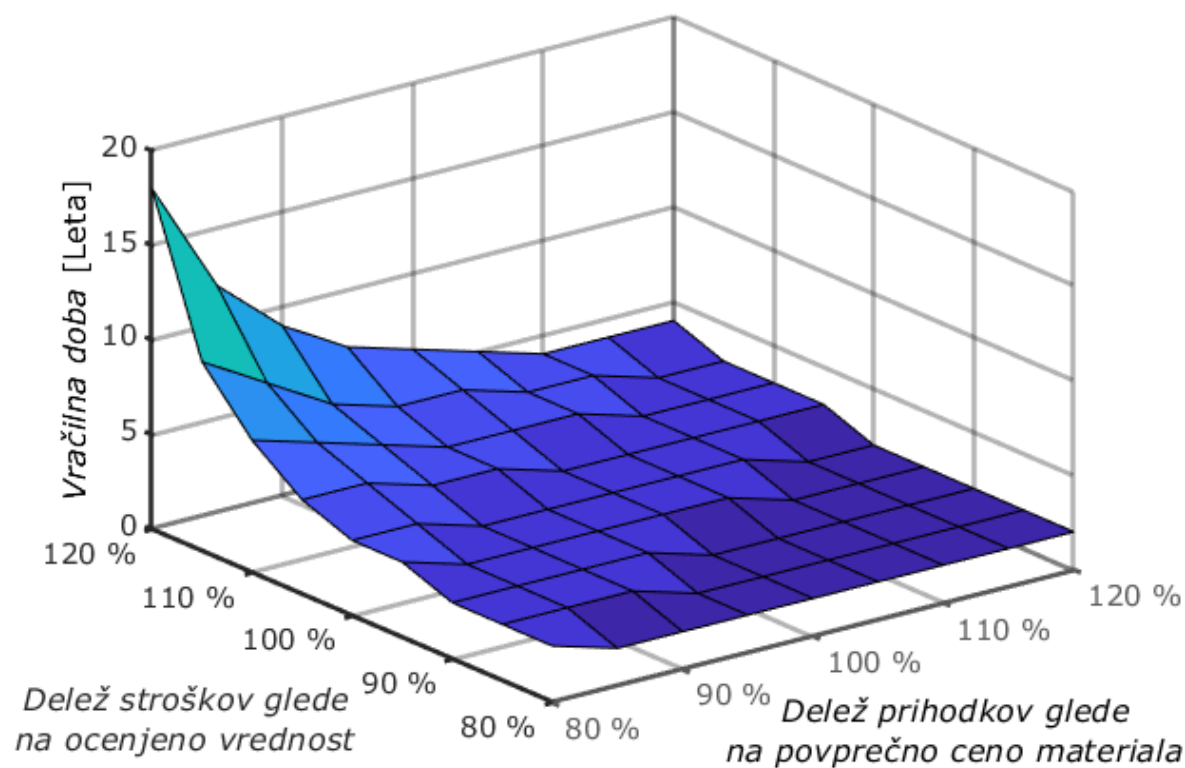
MOŽNOSTI ZA VZDRŽNOST RECIKLAŽNE INDUSTRIJE V SLOVENIJI

- Pri realiziranem prihodku iz prodanega materiala je bil upoštevan 22 % davek.

Ime materiala	Povprečna cena [€/tono]
Steklo	60,00
Aluminij	2.500,00
Baker	8.500,00

- Fiksni obratovalni in vzdrževalni stroški: ~ 850.000,00 €

MOŽNOSTI ZA VZDRŽNOST RECIKLAŽNE INDUSTRIJE V SLOVENIJI



Vračilna doba investicije v odvisnosti od deleža stroškov in deleža prihodkov

OKOLIJSKI VPLIVI IN TRAJNOSTNI VIDIKI

- Študije ocenjujejo, da ogljični odtis proizvodnje PV modulov znaša med 40 in 100 g CO₂/kWh.

Material	CO ₂ eq/kg	Povprečna masa v modulu [kg]	Emisije CO ₂ na modul [kg]
Steklo	0,75	15-18	11-13,5
Aluminij	2,60	2-2,5	5,2-6,5
Polimer	0,70	1,3-1,5	0,9-1,1
Proizvodnja silicija	2,00	0,6-0,7	1,2-1,4
Čiščenje silicija	30,00-35,00	0,6-0,7	18-25,5

- Skupni odtis reciklažnega procesa za tipični 60-celični kristalni PV modul naj bi znašal med 2 in 5 CO₂eq/PV modul.

UKREPI ZA ZMANJŠANJE OKOLIJSKEGA VPLIVA RECIKLAŽE

- Eden izmed učinkovitih ukrepov za zmanjšanje vpliva reciklažnih postopkov se začne že v fazi načrtovanja.
- Podaljšanje življenjske dobe z uporabo naprednejših premazov in stabilnejših materialov zmanjšuje količino odpadkov.
- Pri postopkih so možne naslednje izboljšave:
 - pri mehanskem postopku omogočeno natančnejše ločevanje zdrobljenega materiala;
 - pri kemičnem postopku izboljšava ekstrakcije materiala z manj agresivnimi reagenti;
 - pri termičnem postopku vpeljava nizkotemperaturnega postopka za ločevanje EVA folije in preostalih materialov.

ZAKLJUČEK

- PV moduli po preteku življenjske dobe (ali že prej) postanejo odpadki, zaradi rasti PV sistemov pa bo **količina odpadkov do leta 2050 močno narastla**.
- V okviru analize so bile prepoznane prednosti in slabosti posameznih pristopov postopkov reciklaže:
 - **Termični postopki** omogočajo učinkovito odstranjevanje plasti vendar so energetsko prepotratni.
 - **Kemični postopki** omogočajo selektivno ločevanje materialov, vendar zahtevajo uporabo nevarnih reagentov in imajo predolg reakcijski čas.
 - **Mehanski postopki** so trenutno najbolj perspektivni, ker omogočajo ločevanje materialov z relativno nizko porabo energije in manjšim vplivom na okolje, vendar omogočajo reciklažo glavnih komponent.
- Študija potrjuje, da reciklaža PV modulov ni zgolj tehnični izziv, vendar kompleksna naloga, kjer se prepletajo okoljski, ekonomski in družbeni dejavniki.
- S stroškovno analizo smo ugotovili, da je **finančna vzdržnost PV modulov velik izziv**, predvsem zaradi visokih stroškov postopkov in razmeroma nizke vsebnosti dragocenih materialov.

Hvala za Vašo
pozornost!